

Фундаментальная  
физика  
и астрономия



Блинников С.И. (ИТЭФ и ЦФПИ ВНИИА)  
Вводная лекция 1 – ИТЭФ для МФТИ

02.02.2023

Кафедра «Теоретическая астрофизика и квантовая теория поля» [Блинников С.И.](#), [Глазырин С.И.](#), [Панов И.В.](#), [Поташов М.Ш.](#), [Утробин В.П.](#) - зав., [Юдин А.В.](#) - зам.зав.

курсы лекций:

- Проблемы современной астрофизики
- Введение в астрофизику
- Физика звезд: структура и эволюция
- Основы релятивистской астрофизики
- Основы гидродинамики
- Физика релятивистских звезд
- Теория сверхновых звезд
- Космология
- Астрофизический нуклеосинтез

<https://dau.itep.ru/sn2/education>

# Темы для “Горизонтов физики”

---

- Звезды, их основные характеристики и свойства
- Образование звезд
- Расстояния до звезд, лестница расстояний.
- Диаграмма Г-Р.
- Уравнения равновесия звезды. Оценка её параметров (температура и т.п.)
- Теорема о вириале, отрицательная теплоемкость звезды
- Характерные времена звезды ( $t_n$ ,  $t_T$ ,  $t_H$ )
- Процесс горения H в звезде: p-p и CNO
- Сход звезды с ГП, стадия красного гиганта
- 3-альфа реакция. Судьбы звезд разной массы
- Белые карлики. Предел Чандрассекара
- Сверхновые Ia
- Двойные звезды. Особенности эволюции в двойных системах
- Эволюция массивных звезд, предсверхновые.
- Механизмы взрыва CCSN (внутренняя задача)
- SN1987A, нейтрино от сверхновых
- Сверхновые: внешняя задача – спектры, кривые блеска и т.д.
- Пульсары, нейтронные звезды.
- Гамма-всплески.
- Космический нуклеосинтез.

## Почему всё больше астрофизиков получают Нобелевские премии по физике

---

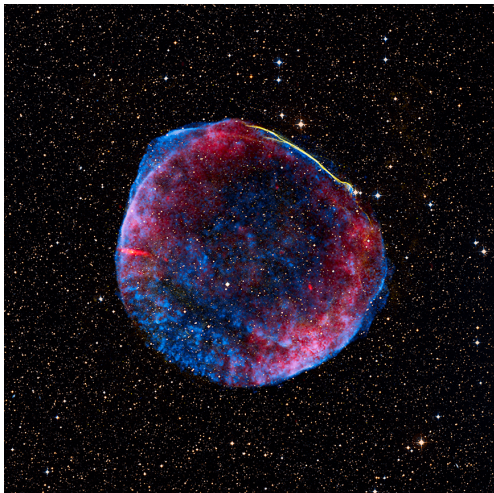
Далеко не все важные открытия в астрономии удостоены нобелевской премии (например, открытие квазаров, т.е. сверхмассивных чёрных дыр). Но те, что удостоены, несомненно, важны для физики.

1936. За открытие космических лучей (CR, КЛ). **Victor Franz Hess.**

1954. За метод совпадений для обнаружения космических лучей. **Walther Bothe.**

Основатель ИТЭФа А.И.Алиханов – Арагац, наблюдения КЛ.

Сейчас нет сомнений, что основная доля КЛ производится в остатках сверхновых, Supernova Remnants = SNR.



## Важные числа о сверхновых:

---

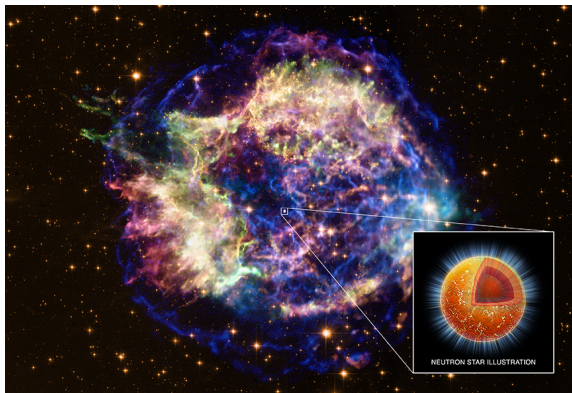
Кинетическая энергия выброса  $\sim 10^{51}$  эрг =  
**1 foe** =  $10^{44}$  Дж

У обычных SN световая энергия за первый год  
 $\sim 0.01$  foe

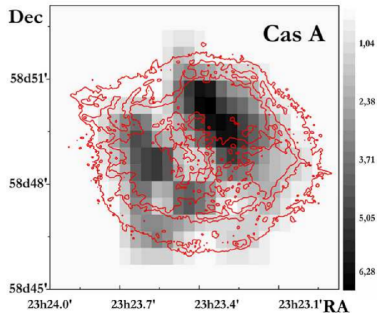
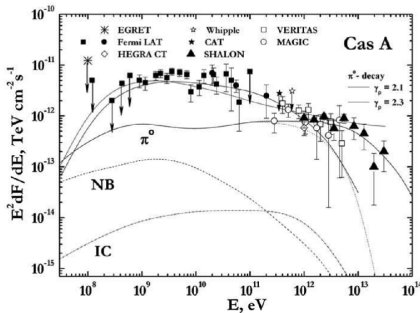
**У сверхмощных SLSNe:  $\sim 1$  foe и выше**

# Supernova Remnant (SNR) Cas A: Chandra X-ray observatory

---



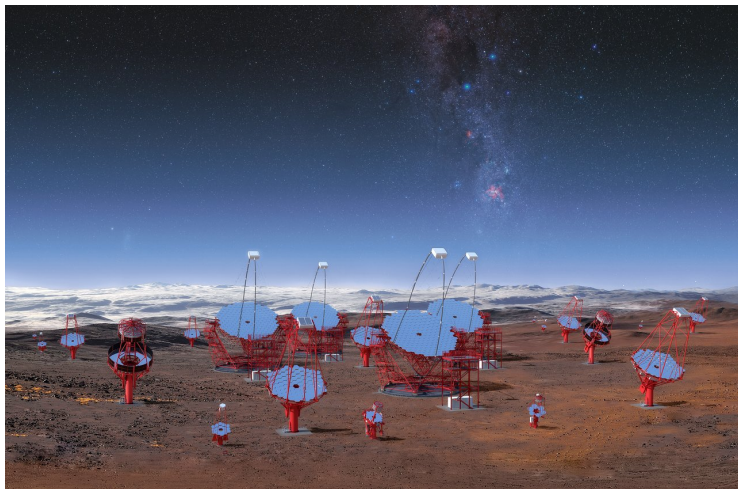
# SNR Cassiopeia A: Fermi-LAT, SHALON, etc





# Cherenkov Telescope Array

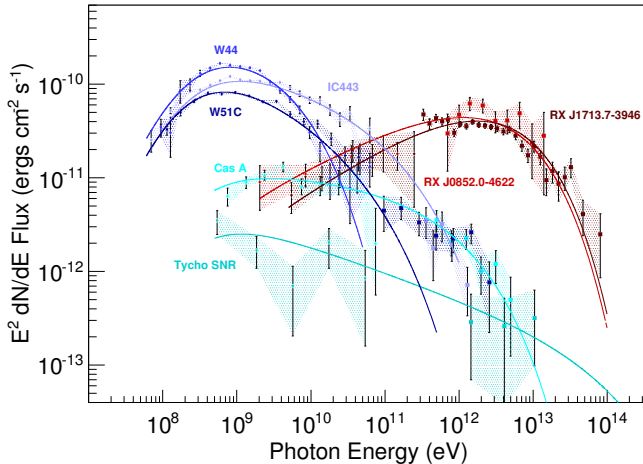
---



<https://www.cta-observatory.org/about/>

# Typical $\gamma$ -ray energy spectra for several of the most prominent SNRs

---



## Нобелевские за космос-2

---

1967. Теория ядерных реакций, как источников энергии звёзд.

**H.Bethe.**

1970. Фундаментальные работы и открытия в магнитной гидродинамике. **H.Alfvén**

1974. Радиоастрономия, открытие пульсаров.

**M. Ryle, A. Hewish, – J.Bell.**

1978. Открытие микроволнового реликтового излучения CMB.

**A.Penzias, R.Wilson.**

1983. Строение и эволюция звёзд (**S.Chandrasekhar**) и образование химических элементов во Вселенной (**W.Fowler**) –

**F.Hoyle .**

1993. Открытие нового типа пульсаров, давшее новые возможности в изучении гравитации (**binary PSR, GW!**).

**R.Hulse, J.Taylor.**

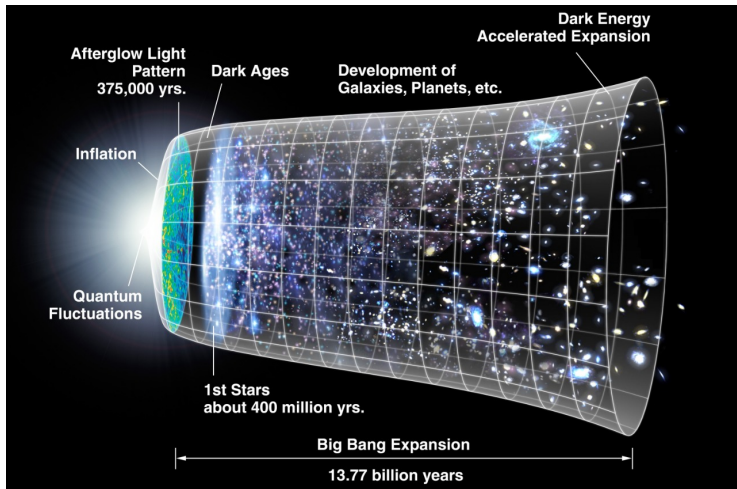
## Нобелевские за космос-3

---

2002. Обнаружение космических нейтрино **R.Davis, M.Koshiya**,  
и рентгеновских (X-ray) источников **R.Giacconi**.
2006. CMB анизотропия **George Smoot, John C. Mather**
2011. Ускорение расширения Вселенной **Adam Riess, Brian  
Schmidt, Saul Perlmutter**  
(см. обзор УФН, июнь 2019, Блинников и Долгов)
2017. LIGO – гравволны, слияние чёрных дыр (GWs, BH  
merging) **Kip Thorne, Rainer Weiss, Barry Barish**
2019. Космология **Jim Peebles**, экзопланеты **Michel Mayor,  
Didier Queloz**.
2020. **Roger Penrose, Reinhard Genzel, Andrea Ghez** – чёрные  
дыры

# Инфляция – Big Bang – наша эпоха

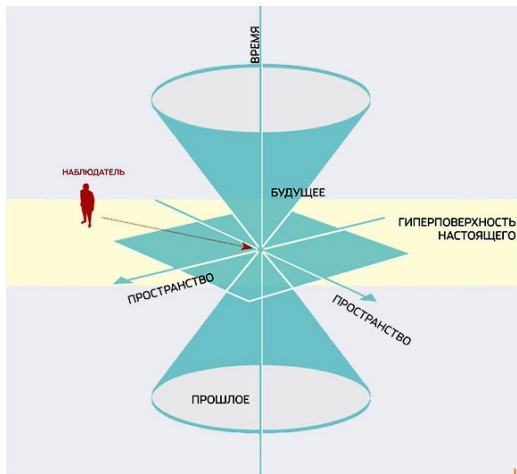
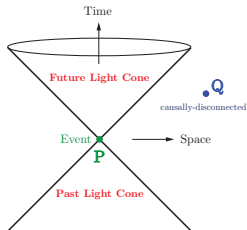
---



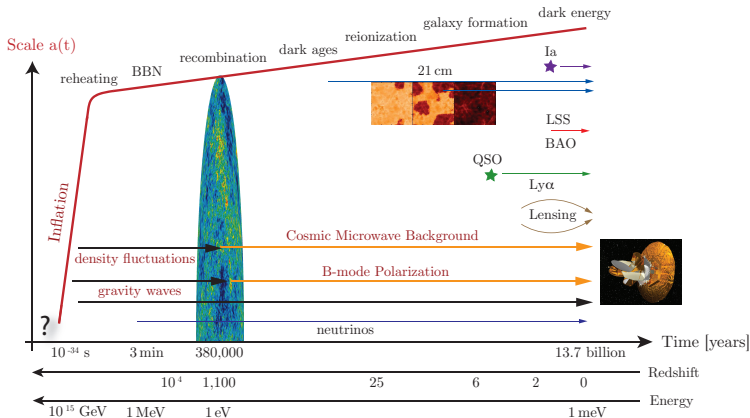
# Отличие эксперимента в физике и в астрономии

В астрономии **не эксперимент, а наблюдение.**

Не только воспроизводимость: важно, что наблюдение почти исключительно **на световом конусе.**

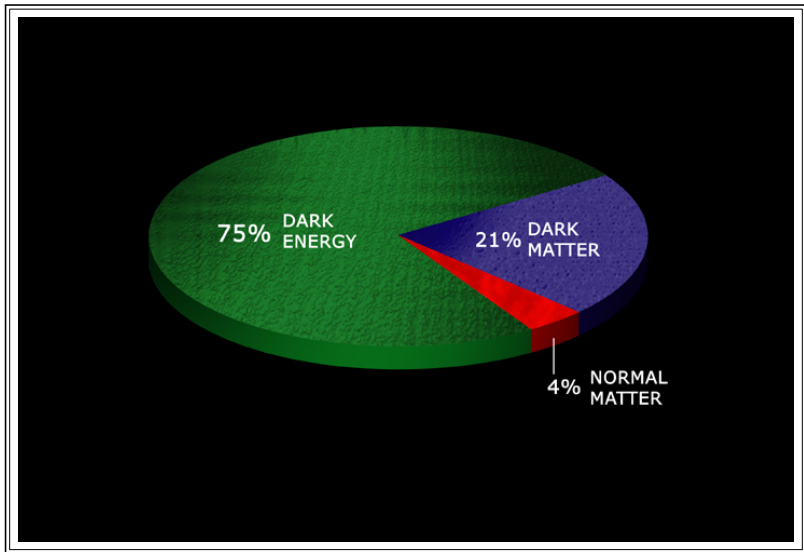


# Схематично об истории Вселенной: Timeline



# Dark Matter and Dark Energy pie

---





# Проблемы

---

- Стандартная модель физики – несколько процентов Вселенной
- Стандартная модель космологии – нужны поля с “новой” физикой
- Что такое Тёмная энергия, **DE**?
- Что такое Тёмная Материя, **DM**?
- Образование структур, LSS, скопления, галактики, звёзды
- Квазары, чёрные дыры
- Гамма-всплески, сверхновые

# Звёзды живут в галактиках

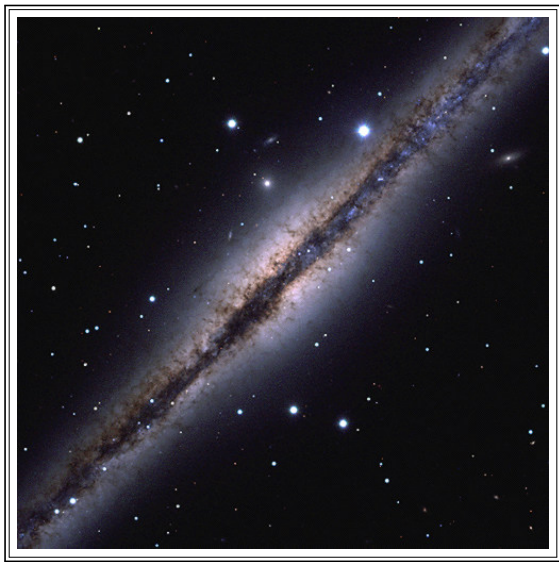
---

## Галактика M51 “Водоворот”



## Spiral NGC891 edge-on

---



# Спиральные и эллиптические

---



# Dark Matter

---

Сначала открыли Тёмную Материю (ТМ=DM), это не Тёмная Энергия (ТЭ=DE)!

## Скопления как гравлинзы

---

Искаженные образы очень далеких галактик получаются из-за влияния гравитационного поля более близкого скопления галактик – эффект **гравлинзы**.

Оценки массы скоплений, полученных при такой интерпретации выявляют **большое количество тёмной материи** в неплохом согласии с вириальной оценкой массы.

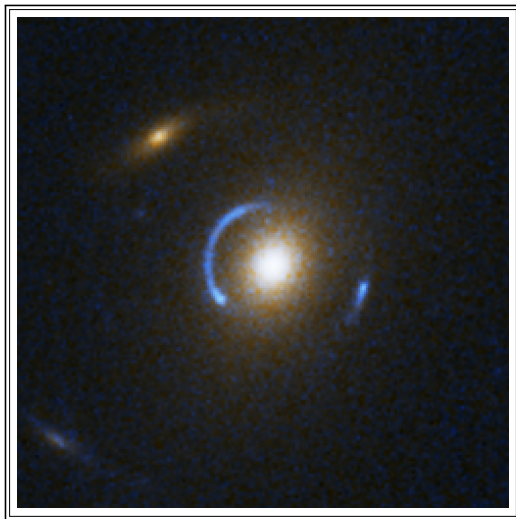
# Скопление галактик 0024+1654 – гравлинза

---



# Einstein Ring

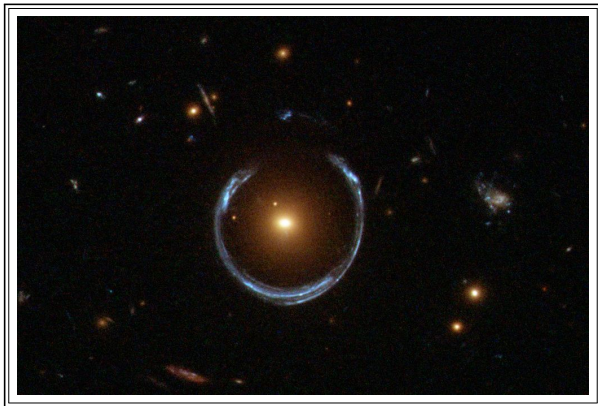
---



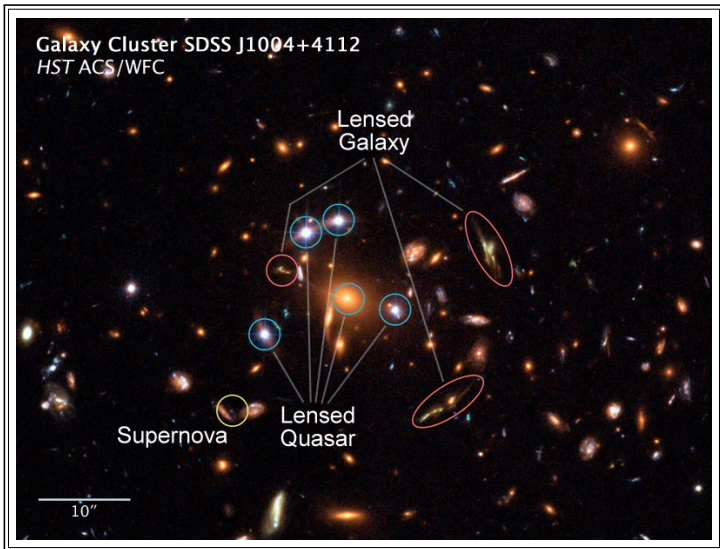


# Кольцо Эйнштейна

---



# Lensing by SDSS J1004+4112



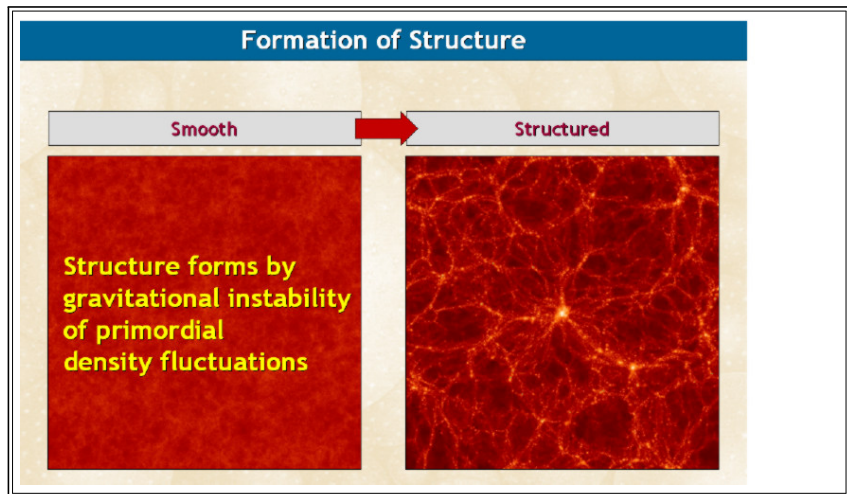
# Крест Эйнштейна

---



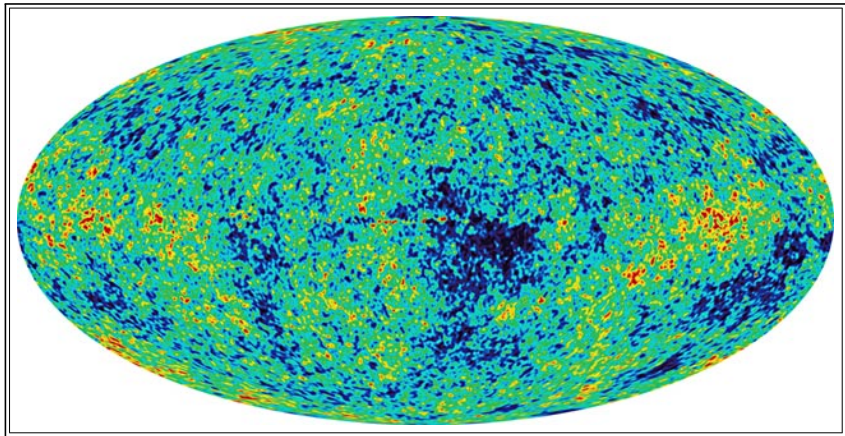
## Ещё один важнейший аргумент

---



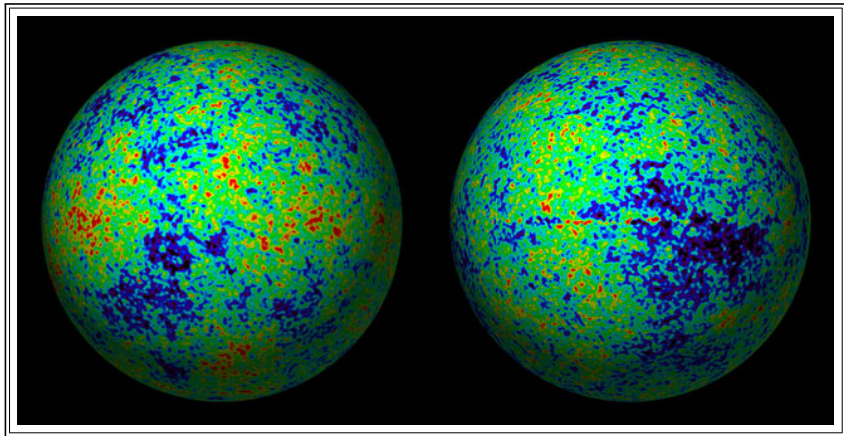
# CMB – WMAP sky

---



# WMAP globes

---



# Предсказания реликтового излучения

Дикке, Пиблз и др. искали, Пензиас, Вилсон нашли случайно

№. 4124 November 13, 1948

NATURE

with  $T \propto 1/l$  and  $R_0 = 1.9 \times 10^9 \sqrt{-1}$  light-years. The integrated values of  $\rho_{\text{mat}}$  and  $\rho_{\text{rad}}$  intersect at a reasonable time, namely,  $3.5 \times 10^{14}$  sec.  $\approx 10^7$  years, and the masses and radii of condensations at this time become, according to the Jeans' criterion,  $M_c = 3.8 \times 10^3$  sun masses, and  $R_c = 1.1 \times 10^3$  light-years. The temperature of the gas at the time of condensation was  $600^\circ$  K., and the temperature in the universe at the present time is found to be about  $5^\circ$  K.

We hope to publish the details of these calculations in the near future.

Our thanks are due to Dr. G. Gamow for the proposal of the topic and his constant encouragement during the process of error-hunting. We wish also to thank Dr. J. W. Follin, jun., for his kindness in performing the integrations required for the determination of  $\alpha$ , on a Reeves Analogue Computer. The work described in this letter was supported by the United States Navy, Bureau of Ordnance, under Contract NOrd-7386.

RALPH A. ALPHER  
ROBERT HERMAN

If we t  
able esti  
the origi  
been  $2^{10}$   
present  
two-third  
that is,  
surface r  
times the

It mig  
generated  
but even  
crepancy  
the ocean  
of solid  
postulate  
to imagi  
was extr  
also esca  
of argon  
argon. ]  
argon of  
is deriv

## Наблюдаемое Реликтовое излучение

---

A primordial fluctuation spectrum in baryons consistent with the CMB fluctuations measurements does not allow the observed structure to form until today. Weakly interacting particles can begin to form structure earlier, while the baryonic matter is overwhelmed by photon pressure until the time of recombination (“**dark matter boost**”).

**Реликтовое излучение настолько изотропно, что возмущения плотности в барионах не могли быть больше  $10^{-5}$ , а вырасти они могли только в  $(1 + z)$  раз, где красное смещение  $z = 3000 \text{ K} / 3 \text{ K}$ . Возмущения растут сначала в ТМ – поэтому она так нужна.**

Важны работы Лифшица, Зельдовича, Пиблза.

Ionization freeze-out: Зельдович, Курт, Сюняев; Пиблз.



**Регистрация гравитационных волн  
(Нобелевская премия 2017)  
и гамма-всплеска от сливающихся нейтронных  
звёзд:  
история, результаты и перспективы**

**С.Блинников (при помощи П.Бакланова, А.Юдина, ИТЭФ)**

GW+ $\gamma$

# FIRST COSMIC EVENT OBSERVED IN GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT

---

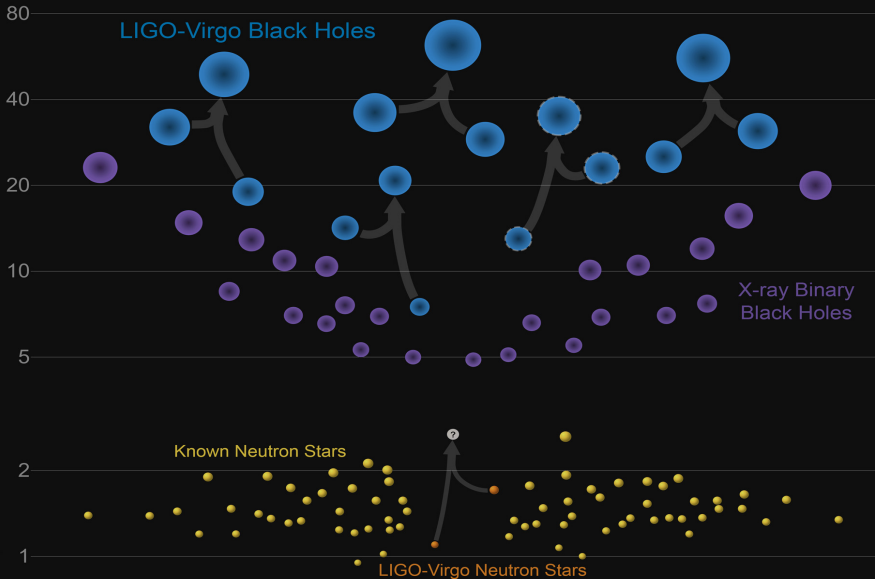


Georgia Tech  
Center for  
Relativistic  
Astrophysics



# Masses in the Stellar Graveyard

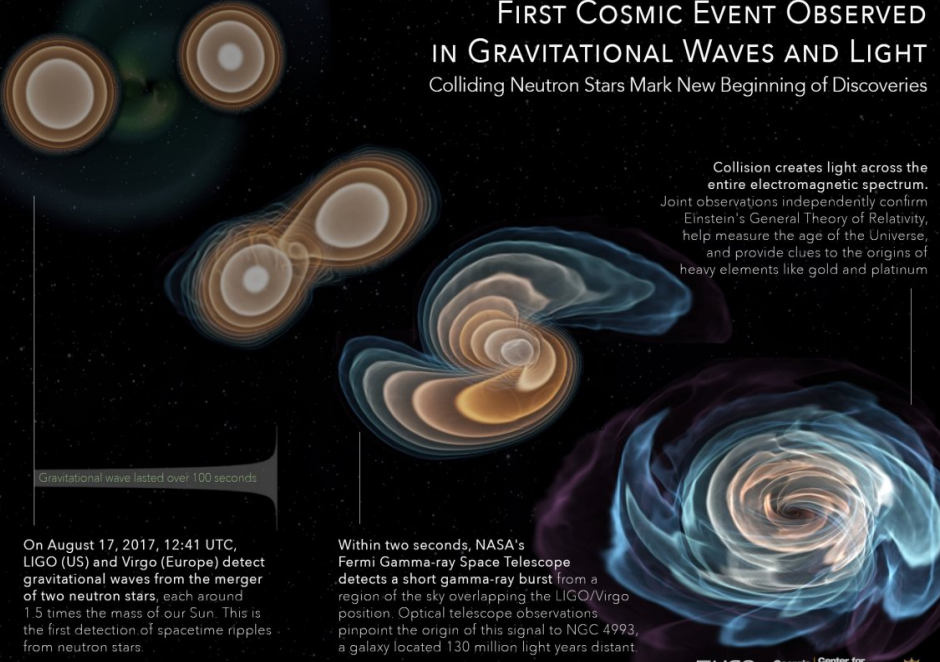
*in Solar Masses*



# FIRST COSMIC EVENT OBSERVED IN GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT

Colliding Neutron Stars Mark New Beginning of Discoveries

Collision creates light across the entire electromagnetic spectrum. Joint observations independently confirm Einstein's General Theory of Relativity, help measure the age of the Universe, and provide clues to the origins of heavy elements like gold and platinum



Gravitational wave lasted over 100 seconds

On August 17, 2017, 12:41 UTC, LIGO (US) and Virgo (Europe) detect gravitational waves from the merger of two neutron stars, each around 1.5 times the mass of our Sun. This is the first detection of spacetime ripples from neutron stars.

Within two seconds, NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope detects a short gamma-ray burst from a region of the sky overlapping the LIGO/Virgo position. Optical telescope observations pinpoint the origin of this signal to NGC 4993, a galaxy located 130 million light years distant.

# GW170817

## Слияние двух нейтронных звезд

Наблюдалось детекторами гравитационных волн LIGO / Virgo и более 70 электромагнитными обсерваториями.



Расстояние  
130 млн. световых лет

Произошло  
17 Августа 2017

Тип  
Слияние нейтронных звезд

**12:41:04 UTC**

Детектирована гравитационная волна от слияния нейтронных звезд

### Гравитационная волна

Две нейтронные звезды, каждая размером с город, но с массой не меньше массы Солнца

### Гамма излучение

Короткая вспышка гамма-излучения это яркий луч гамма излучения, генерируемый сразу после слияния звезд

**+ 2 секунды**

Детектирована вспышка гамма излучения.

**+10 часов 52 минуты**

Новый яркий источник оптического излучения обнаружен в галактике NGC 4993, в созвездии Тидры.

**+11 часов 36 минут**

Наблюдается инфракрасное излучение

**+15 часов**

Детектировано яркое ультрафиолетовое излучение.

**+9 дней**

Обнаружено рентгеновское излучение

**+16 дней**

Обнаружено излучение радио-диапазона

### Килоновая

Эволюция богатого нейтронами вещества вызывает свечение килоновой, происходит синтез тяжелых элементов, таких как золото и платина

### Остаточное радио-излучение

Выброс материала из звезды приводит к ударной волне в межзвездной среде. Это создает радио-излучение, которое может продолжаться годами.

GW170817 позволяет нам впервые измерить скорость расширения вселенной напрямую, используя гравитационные волны.

Регистрация гравитационного излучения от слияния нейтронных звезд позволяет нам узнать больше о строении этих необычных объектов

Регистрация этого события различными детекторами подтверждает, что слияние нейтронных звезд может порождать вспышки гамма излучения

Полученные данные о килоновой позволили показать, что столкновения нейтронных звезд могут быть источником большинства тяжелых ядер, например золота, во вселенной.

Наблюдение гравитационных и электромагнитных волн от одного события позволяет уверенно утверждать что гравитационные волны распространяются со скоростью света



## Важное о **GW170817**

---

- GW170817 – 6-е гравитационно-волновое событие и 1-ое наблюдение слияния объектов с массами нейтронных звезд.
- Гамма-всплеск GRB170817A наблюдался спустя 1.7 сек. после потери сигнала GW170817.
  - Подтверждена связь коротких GRB со сливающимися NS
  - Ограничения на гравитацию: скорость распространения ( $\Delta v/c \lesssim 10^{-15}$ ), лоренц-инвариантность, принцип эквивалентности

## Важное о **GW170817**

---

- Спустя 11 часов открыт источник в видимом свете в NGC 4993
  - Кривые блеска и спектры соответствуют килоновой
  - Синтез тяжелых элементов в r-процессе
  - Космология: независимое измерение расстояний, параметра Хаббла
- Впервые выполнены наблюдения одного объекта в грав.волновом и эл.-маг. (гамма, рентген, ультрафиолет, видимый и инфракрасный свет, радио) канале. Для нейтрино далеко

Начало эры многодиапазонной (многоканальной) астрономии – multi-messenger astronomy

## Немного личного из 2017 года

---

Kip S Thorne

Sun, Sep 3, 2017 at 1:32 AM

To: Sergei Blinnikov

Dear Sergei,

How very nice to hear from you.

...

I remember well your old paper with Igor, Sasha, and Tanja on exploding neutron stars. It was very surprising to me at first, but then made sense when I read it. We can hope for a LIGO discovery of gravitational waves from merging neutron stars, with gamma ray burst, in the near future.

With warm best wishes,

Kip

=====

Kip S. Thorne: [kip@tapir.caltech.edu](mailto:kip@tapir.caltech.edu)

350-17 Caltech, Pasadena, CA 91125

Phone: +1 626 395-4598



# INTEGRAL and NASA's Fermi satellite

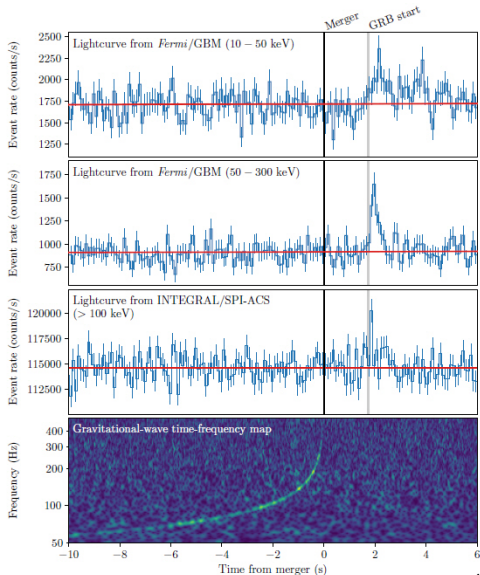


(INTEGRAL)



INTErnational  
Gamma-Ray  
Astrophysics  
Laboratory

The Fermi  
Gamma-ray  
Space  
Telescope



# GW170817 and GRB170817A

---

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L13 (27pp), 2017 October 20

© 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.

**OPEN ACCESS**

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa920c>



## **Gravitational Waves and Gamma-Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A**

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, *Fermi* Gamma-ray Burst Monitor, and INTEGRAL  
(See the end matter for the full list of authors.)

*Received 2017 October 6; revised 2017 October 9; accepted 2017 October 9; published 2017 October 16*

# GW170817 and GRB170817A

---

## 1. Introduction and Background

GW170817 and GRB 170817A mark the discovery of a binary neutron star (BNS) merger detected both as a gravitational wave (GW; LIGO Scientific Collaboration & Virgo Collaboration 2017a) and a short-duration gamma-ray burst (SGRB; Goldstein et al. 2017; Savchenko et al. 2017b). Detecting GW radiation from the coalescence of BNS and neutron star (NS)–black hole (BH) binary systems has been a major goal (Abbott et al. 2017a) of the LIGO (Aasi et al. 2015) and Virgo (Acernese et al. 2015) experiments. This was at least partly motivated by their promise of being the most likely sources of simultaneously detectable GW and electromagnetic (EM) radiation from the same source. This is important as joint detections enable a wealth of science unavailable from either messenger alone (Abbott et al. 2017f). BNS mergers are predicted to yield signatures across the EM spectrum (Metzger & Berger 2012; Piran et al. 2013), including SGRBs (Blinnikov et al. 1984; Paczynski 1986; Eichler et al. 1989; Paczynski 1991; Narayan et al. 1992), which produce prompt emission in gamma-rays and longer-lived afterglows.

# GW170817 and GRB170817A, INTEGRAL

---

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L15 (8pp), 2017 October 20

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa8f94>

© 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.



## ***INTEGRAL* Detection of the First Prompt Gamma-Ray Signal Coincident with the Gravitational-wave Event GW170817**

V. Savchenko<sup>1</sup>, C. Ferrigno<sup>1</sup>, E. Kuulkers<sup>2</sup>, A. Bazzano<sup>3</sup>, E. Bozzo<sup>1</sup>, S. Brandt<sup>4</sup>, J. Chenevez<sup>4</sup>, T. J.-L. Courvoisier<sup>1</sup>, R. Diehl<sup>5</sup>, A. Domingo<sup>6</sup>, L. Hanlon<sup>7</sup>, E. Jourdain<sup>8</sup>, A. von Kienlin<sup>5</sup>, P. Laurent<sup>9,10</sup>, F. Lebrun<sup>9</sup>, A. Lutovinov<sup>11,12</sup>, A. Martin-Carrillo<sup>7</sup>, S. Mereghetti<sup>13</sup>, L. Natalucci<sup>3</sup>, J. Rodi<sup>3</sup>, J.-P. Roques<sup>8</sup>, R. Sunyaev<sup>11,14</sup>, and P. Ubertini<sup>3</sup>

# GW170817 and GRB170817A, INTEGRAL

---

## 1. Introduction

It has long been conjectured that the subclass of gamma-ray bursts (GRBs) with a duration below about 2 s, known as short gamma-ray bursts (sGRBs), are the product of a binary neutron star (BNS) merger and that gamma-rays are produced in the collimated ejecta following the coalescence (e.g., [Blinnikov et al. 1984](#); [Nakar 2007](#); [Gehrels & Meszaros 2012](#); [Berger 2014](#)). So far, there was only circumstantial evidence for this hypothesis, owing to the lack of supernovae associated with sGRBs, their localization in early-type galaxies, and their distinct class of duration (e.g., [D'Avanzo 2015](#)). The advent of advanced gravitational-wave (GW) detectors, which have been able to detect binary black hole mergers ([Abbott et al. 2016a, 2016b, 2016c, 2017](#); LIGO Scientific Collaboration & Virgo Collaboration [2017a](#)) and have the capability to detect a signal from nearby BNS mergers ([Abbott et al. 2016c](#)), have sparked great expectations. Different electromagnetic signatures are expected to be associated with BNS merger events, owing to expanding ejecta, the most obvious of which is an sGRB in

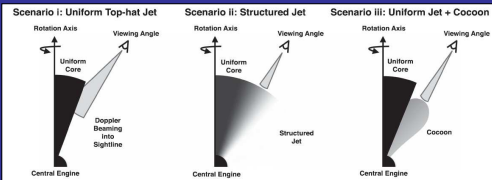
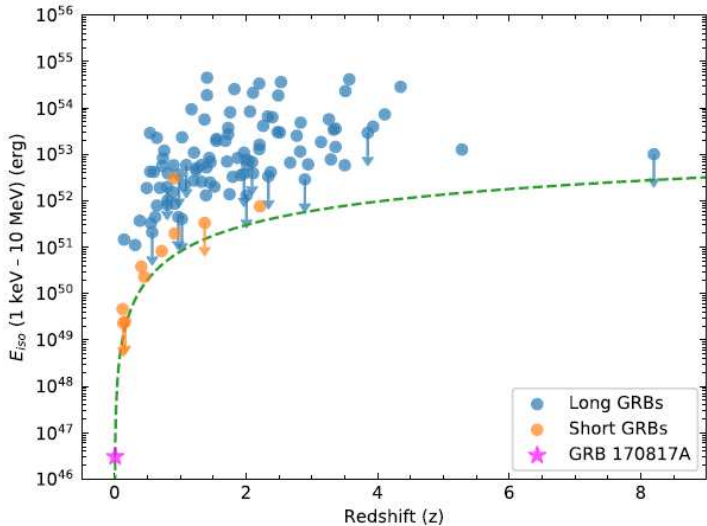
# NS+NS $\Rightarrow$ GRB: предсказание 1984 и 1990

## Exploding neutron stars in close binaries

S. I. Blinnikov, I. D. Novikov, T. V. Perevodchikova, and A. G. Polnarev

Once having achieved  $m_2 = m_{\min}$ , star 2 will lose its hydrostatic stability and will begin to expand at a rate determined by  $t_{\text{hyd}}$  and the amended equation of state. Clark and Eardley<sup>6</sup> estimate that perhaps one neutron star may undergo tidal disruption every 100 yr within a 15-Mpc radius; thus the event would not be exceedingly rare. Not only should a burst of gravitational waves be produced,<sup>6</sup> but also a powerful electromagnetic flare (most likely x rays and  $\gamma$  rays). Page<sup>2</sup> believes that the explosion may attain an energy of supernova scale, but the problem awaits a detailed analysis. We intend to consider this process further in a separate paper.

We also have omitted discussion here of the physical processes that will accompany the mass transfer, such as the stripping from the star of material with nuclei having excess neutrons; as these nuclei later decay,  $\gamma$ -ray burster phenomena might occur (like the processes that Bisnovatyi-Kogan and Checkëtkin<sup>13</sup> have discussed).



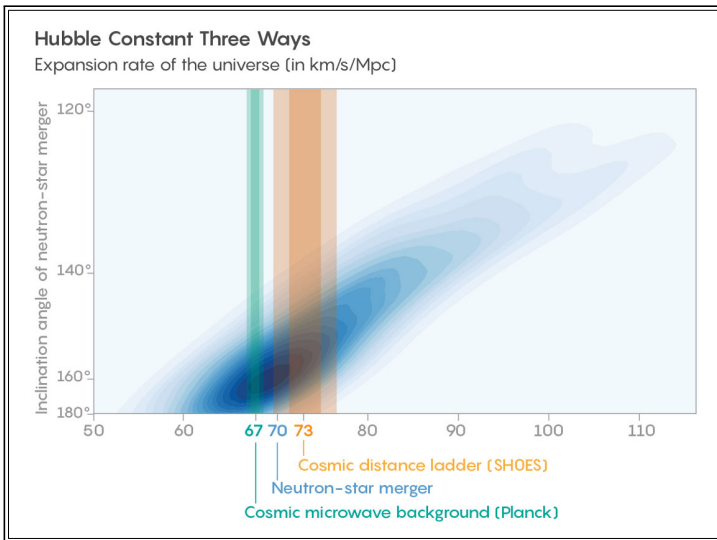
#### 4.1. Speed of Gravity

Assuming a small difference in travel time  $\Delta t$  between photons and GWs, and the known travel distance  $D$ , the fractional speed difference during the trip can be written  $\Delta v/v_{\text{EM}} \approx v_{\text{EM}}\Delta t/D$ , where  $\Delta v = v_{\text{GW}} - v_{\text{EM}}$  is the difference between the speed of gravity  $v_{\text{GW}}$  and the speed of light  $v_{\text{EM}}$ . This relation is less constraining for small distances, hence we conservatively use here  $D = 26$  Mpc, the lower bound of the 90% credible interval on luminosity distance derived from the GW signal (Abbott et al. 2017a). If we conservatively assume that the peak of the GW signal and the first photons were emitted simultaneously, attributing the entire  $(+1.74 \pm 0.05)$  s lag to faster travel by the GW signal, this time difference provides an upper bound on  $\Delta v$ . To obtain a lower bound on  $\Delta v$ , one can assume that the two signals were emitted at times differing by more than  $(+1.74 \pm 0.05)$  s with the faster EM signal making up some of the difference. As a conservative bound relative to the few second delays discussed in Section 2.1, we assume the SGRB signal was emitted 10 s after the GW signal. The resulting constraint on the fractional speed difference is

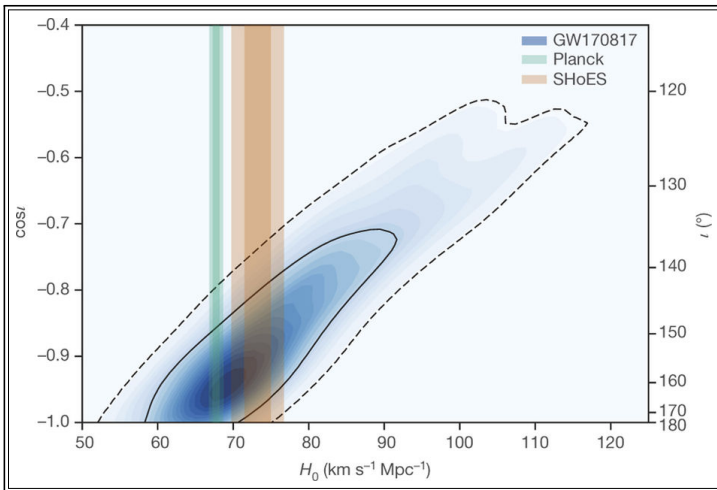
$$-3 \times 10^{-15} \leq \frac{\Delta v}{v_{\text{EM}}} \leq +7 \times 10^{-16}. \quad (1)$$

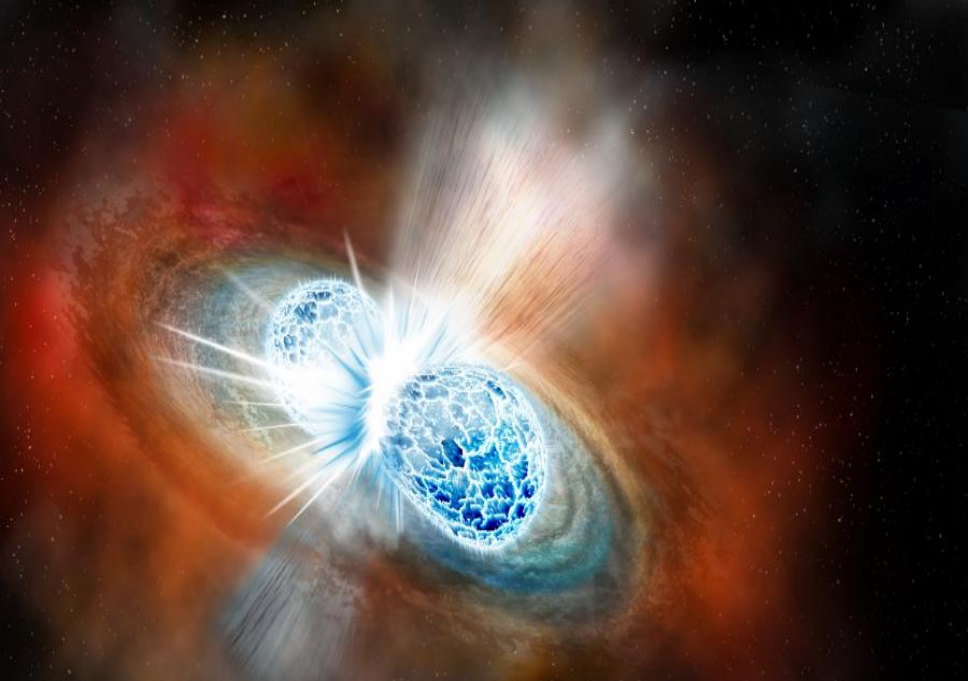


# Измерение параметра Хаббла из GW



# Измерение параметра Хаббла из GW





Caption: Artist's concept of the explosive collision of two neutron stars. Illustration by Robin Dienel courtesy of the

# Нобелевская по физике 2020

---



Роджер Пенроуз (Roger Penrose), Райнхард Генцель (Reinhard Genzel) и  
Андреа Гез (Andrea Ghez)

**Пенроуз:** «за открытие, согласно которому общая теория относительности надежно предсказывает рождение черных дыр».

**Генцель и Гез:** «за открытие сверхмассивного компактного объекта в центре нашей Галактики».

Посмотрим мультики

Спасибо за внимание!